

## **General Disclaimer**

### **One or more of the Following Statements may affect this Document**

- This document has been reproduced from the best copy furnished by the organizational source. It is being released in the interest of making available much information as possible.
- This document may contain data, which exceeds the sheet parameters. It was furnished in this condition by the organizational source and is the best copy available.
- This document may contain tone-on-tone or color graphs, charts and/or pictures which have been reproduced in black and white.
- This document is paginated as submitted by the original source.
- Portions of this document are not fully legible due to the historical nature of some of the material. However, it is the best reproduction available from the original submission.

(NASA-CR-169325) STUDY OF ATMOSPHERIC  
DIFFUSION USING LANDSAT (Instituto de  
Pesquisas Espaciais, Sao Jose) 32 p  
HC A03/MF A01

N82-33794

CSCL 04A

G3/43 Unclass  
33747

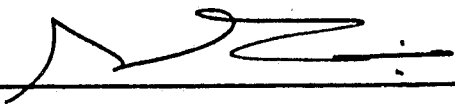


SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA  
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

RECEIVED BY  
NASA STI FACILITY  
DATE: 4-28-82  
DCOF NO. 002949  
RECEIVED BY  
☒ NASA STI FACILITY  
☐ ECA-803 ☐ AIAA



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

1. Publicação nº INPE-2335-PRE/082	2. Versão	3. Data Fev., 1982	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem DME	Programa RECAT		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) DIFUSÃO; IMAGENS LANDSAT; POLUIÇÃO			
7. C.D.U.: 551.511.6:551.510.42			
8. Título  ESTUDO DA DIFUSÃO ATMOSFÉRICA USANDO IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT		10. Páginas: 31	
		11. Última página: 29	
		12. Revisada por  Fausto Carlos de Almeida	
9. Autoria José Aparecido Torsani Yelissety Viswanadham		13. Autorizada por  Nelson de Jesus Parada Diretor	
Assinatura responsável 			
14. Resumo/Notas  O modelo gaussiano é comumente utilizado para calcular a concentração de poluentes. Para isso são necessários os valores dos parâmetros de difusão (desvio padrão da distribuição de concentração) para diferentes condições. Neste trabalho, valores do desvio padrão da distribuição da concentração, ao longo do eixo Y ( $\sigma_y$ ), foram medidos a partir de imagens obtidas pelo satélite LANDSAT, e comparados com os valores previstos pelos modelos de Pasquill-Gifford, Jülich e Högström.			
<div>ORIGINAL CONTAINS COLOR ILLUSTRATIONS</div> <div>ORIGINAL CONTAINS ORIGINAL CONTAINS ORIGINAL CONTAINS</div>			
15. Observações Submetido à Revista Ciência e Cultura			

ESTUDO DA DIFUSÃO ATMOSFÉRICA  
USANDO IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT

J.A. Torsani<sup>(1)</sup> e Y. Viswanadham<sup>(2)</sup>

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

12.200 - São José dos Campos - SP - Brasil

Resumo

O modelo gaussiano é comumente utilizado para calcular a concentração de poluentes. Para isso são necessários os valores dos parâmetros de difusão (desvio padrão da distribuição de concentração) para diferentes condições. Neste trabalho, valores do desvio padrão da distribuição da concentração, ao longo do eixo Y ( $\sigma_y$ ), foram medidos a partir de imagens obtidas pelo satélite LANDSAT, e comparados com os valores previstos pelos modelos de Pasquill-Gifford, Jülich e Högström.

---

(1) Assistente de Pesquisa, INPE, S.J. Campos, S.P.

(2) Pesquisador Pleno, INPE, S.J. Campos, S.P.

## 1. Introdução

Os poluentes são introduzidos no meio ambiente através de diversas atividades, causando efeitos de larga escala e amplo espalhamento, incluindo os efeitos sobre o clima da Terra; os efeitos de pequena escala estão associados à poluição urbana, cujo transporte e diluição são devidos aos movimentos do ar.

Em anos mais recentes, os métodos para estimativa de dispersão atmosférica foram modificados, com base em resultados obtidos por medidas experimentais. Pasquill (1961) propôs um método para a estimativa de dispersão. Este método, com algumas conversões feitas por Gifford (1961), é atualmente amplamente utilizado. Em vista dos problemas que envolvem a redução dos dados meteorológicos para o cálculo dos parâmetros de difusão, tem-se procurado determinar tais parâmetros diretamente das plumas, utilizando-se técnicas de sensoramento remoto.

O uso do sensoramento remoto para monitorar e identificar fontes poluidoras tem sido explorado nos últimos anos. Randerson (1968) publicou fotografias, obtidas de satélites tripulados, que mostram plumas visíveis perto da costa do Texas.

Com o uso de um analisador automático (GE Image 100) e de imagens obtidas do satélite LANDSAT, foi possível obter perfis de plumas com extensão de aproximadamente 130 km. Desta forma, imagens do LANDSAT podem ser usadas para detectar e monitorar plumas de grande extensão.

O objetivo deste trabalho é obter medidas do desvio padrão da distribuição de concentração com relação ao eixo  $y$  ( $\sigma_y$ ), a partir de imagens obtidas pelo satélite LANDSAT. Tendo-se os valores de  $\sigma_y$ , obtidos das fotografias, comparar-se-ão tais valores com os previstos pelos modelos de Pasquill-Gifford, Jülich e Högström.

## 2. Teoria Básica

A aplicação prática da equação da difusão requer o conhecimento dos desvios padrões  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Esses parâmetros são dados em função da distância da fonte, das condições de estabilidade da atmosfera, da altura da emissão da fonte e da rugosidade superficial. Alguns dos mais importantes sistemas incorporados na aplicação prática do cômputo da difusão são:

### 2.1 - Sistema de Pasquill-Gifford

Pasquill (1961) classificou seis tipos de difusão, dependendo da estabilidade, as quais podem ser determinadas pela velocidade do vento - medida a uma altura de 10m, e pela insolação - definida para períodos do dia e grau de cobertura das nuvens. A expressão proposta para o cálculo de  $\sigma_y$ , em função da distância, é dada por:

$$\sigma_y (x) = (a_1 \ln x + a_2) x \quad (1)$$

onde os coeficientes são especificados na Tabela 1.

### 2.2 - Sistema Jülich

As formulações apresentadas neste sistema foram elaboradas para níveis de emissão de 50 e 100 m. Neste caso, o nível de emissão é de 76 m; por isto houve uma interpolação linear, conforme proposta feita por Vogt (1977). De início a classificação foi organizada de tal forma que uma comparação com as categorias de estabilidade de Pasquill-Gifford fosse possível. O parâmetro  $\sigma_y$  é dado pela função

$$\sigma_y (x) = p_y x^{q_y}$$

onde  $p_y$  e  $q_y$  são coeficientes e estão listados na Tabela 1.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

Tabela 1. Coeficientes de difusão para os diferentes sistemas e categorias de estabilidade.

SISTEMA DE DIFUSÃO	COEFICIENTES DE DIFUSÃO	CATEGORIAS DE ESTABILIDADE					
		A	B	C	D	E	F
Pasquill-Gifford	$a_1$	-0,0234	-0,0147	-0,0117	-0,0059	-0,0051	-0,0029
	$a_2$	0,3500	0,2430	0,1750	0,1080	0,0330	0,0540
Julien - Valores interpolados para 76m	$p_y$	0,3615	0,4094	0,3534	0,3403	1,6910	5,3320
	$q_y$	0,9321	0,8991	0,8738	0,8464	0,6211	0,5778

### 2.3 - Sistema Högström

Neste sistema o cálculo de  $\sigma_y$  efetivo é feito usando-se a seguinte expressão (Högström, 1964):

$$\sigma_y^2 = \sigma_{yd}^2 + \sigma_{ys}^2 \quad (3)$$

onde:

$\sigma_{yd}^2$  = variância devida à difusão turbulenta

$\sigma_{ys}^2$  = variância devida ao cisalhamento vertical da direção do vento (este fator é significativo para longas distâncias).

$\sigma_{yd}$  e  $\sigma_{ys}$  são obtidos a partir das seguintes relações:

$$\sigma_{yd}(x) = 122 S \sqrt{2 \{ \exp(-Cox) + Cox - 1 \}} \quad (4)$$

onde:

$$Co = 10^{-3}$$

$$S = \begin{cases} 0,8 + \frac{0,2}{1 + 3,4 \cdot 10^{-2} R_s} & \text{para condições estáveis e neutras} \\ 1,4 & \text{para condições instáveis} \end{cases}$$

onde  $R_s$  é o parâmetro de estabilidade dado por:

$$R_s = \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \cdot (U_f)^{-2} \cdot 10^5 \quad (5)$$

sendo que:

$\frac{\partial T}{\partial z}$  = Gradiente vertical de temperatura.

$\Gamma$  = Taxa de variação vertical da temperatura adiabática seca.

$U_f$  = Vento médio na altura de 500 metros.

O termo devido ao cisalhamento é dado por:



$$\sigma_{ys}(x) = \frac{|\psi|}{c} \left[ \int_0^x x \sigma_z^2(x) dx - \frac{\sigma_z^2(x) x^2}{4} \right]^{1/2} \quad (6)$$

onde:

$$\begin{aligned} c &= 1,0 \text{ para } \sigma_z \leq \frac{h}{2} \\ &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_z}{h} + \frac{2}{3} \text{ para } \frac{h}{2} \leq \sigma_z \leq 2h \\ &= 2 \text{ para } \sigma_z \geq 2h \end{aligned}$$

$\psi$  = cisalhamento vertical da direção do vento ( $\text{rad. m}^{-1}$ ).

$\sigma_z(x)$  = desvio padrão da distribuição de concentração ao longo do eixo vertical.

Para o caso neutro, o desvio padrão vertical é expresso pela fórmula:

$$\sigma_{zn}(x) = 30,4 \left[ 2 \{ \exp(-a_0 x) + a_0 x - 1 \} \right]^{1/2} \quad (7)$$

onde:

$$a_0 = \left[ 131,02 \log \frac{h}{Z_0} \right]^{-1}$$

Neste trabalho,  $h = 76\text{m}$  e  $Z_0 = 10^{-3}\text{m}$  (Counihan, 1975). Para o caso estável, pode-se escrever o desvio padrão vertical como:

$$\sigma_{ze}(x) = \frac{\sigma_{zn}}{(1 + a R_s)} \quad (8)$$

Na Equação 8,  $R_s$  é o parâmetro de estabilidade, já definido. A quantidade  $a$  é dada por:

$$a = 6 \cdot 10^{-6} \cdot h^{0,62} \cdot Ca^{-2}$$

onde:

$Ca$  = coeficiente de arrastamento geostrofico, referente a condições adiabáticas, dada pela fórmula:

$$Ca = \frac{0,104}{\log (C_a Ro_o) - 2,24}$$

$$Ro_o = \frac{Vg,o}{Zo.f}$$

onde  $Ro_o$  é o Número de Rossby superficial;  $Vg,o$  é a velocidade do vento geostrofico na superfície;  $f$  é o parâmetro de Coriolis ( $= 2 \Omega \sin \phi \text{ s}^{-1}$ );  $\Omega$  é a frequência angular de rotação da Terra; e  $\phi$  é a latitude.

A formulação para o caso instável não será apresentada neste trabalho, por não se ter encontrado nenhum caso para esta condição de estabilidade.

### 3. Determinação da Categoria de Estabilidade Atmosférica

O método mais comumente utilizado é aquele proposto por Pasquill-Gifford (1961), onde a categoria de estabilidade é determinada utilizando-se: 1) Velocidade do vento no nível de 10m e 2) Estimativa quantitativa da insolação durante o dia, e cobertura de nuvens durante a noite (noite refere-se ao período de uma hora antes do pôr do sol e uma hora depois do nascer do sol).

As condições de estabilidade são divididas em seis categorias, conforme Turner (1970):

- A - Extremamente instável.
- B - Moderadamente instável.
- C - Levemente instável.
- D - Neutra.
- E - Levemente estável.
- F - Moderadamente estável.

### 4. Local de Estudo e Dados Disponíveis

O local de estudo foi Cabo Frio, localizado na latitude de  $23^{\circ} 00' \text{ S}$  e longitude  $42^{\circ} 00' \text{ W}$ . Este local é referente à órbita

122 ponto 28 do satélite LANDSAT.

Nas imagens visualiza-se uma pluma proveniente de uma fonte puntual (Companhia Nacional de Alcalis), situada no Arraial do Cabo. Os parâmetros de emissão, conforme informação prestada pela Companhia, são:

Altura da chaminé .....	76 m
Vazão dos gases .....	$200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Velocidade de saída dos gases .....	$7 \text{ m s}^{-1}$
Composição dos gases em volume:	
Vapor d'água .....	47%
$\text{N}_2$ .....	41%
$\text{O}_2$ .....	10%
$\text{CO}_2$ .....	2%
$\text{CO}$ , $\text{NO}_x$ , $\text{SO}_2$ , $\text{Mg}$ , $\text{MgSO}_4$ , $\text{NaCl}$ .....	Traços

Devido à necessidade de obter perfis verticais da velocidade do vento e da temperatura, e tendo-se em vista que no local de estudo conta-se apenas com os dados de superfície, utilizam-se radiossondagens do aeroporto do Galeão, localizado na latitude de  $22^\circ 50' \text{ S}$  e longitude  $43^\circ 14' \text{ W}$ , Rio de Janeiro - RJ, obtidas no horário das 11:00 e das 23:00 GMT. Cabo Frio encontra-se aproximadamente a 100 km leste do Rio de Janeiro (Figura 1).

Os dados necessários à realização dos cálculos estão descritos a seguir:

O primeiro conjunto de dados utilizados está relacionado com observações de superfície, realizados na estação meteorológica da Companhia Nacional de Alcalis, assim como os dados obtidos de radiossondagens realizadas no aeroporto do Galeão, no horário das 11:00 GMT, e os dados de cobertura de nuvens (porcentagem) e elevação solar, fornecidos pelo satélite LANDSAT. O conjunto de dados citados acima encontra-se disposto na Tabela 2.

ORIGINAL OF  
OF POOR QUALITY

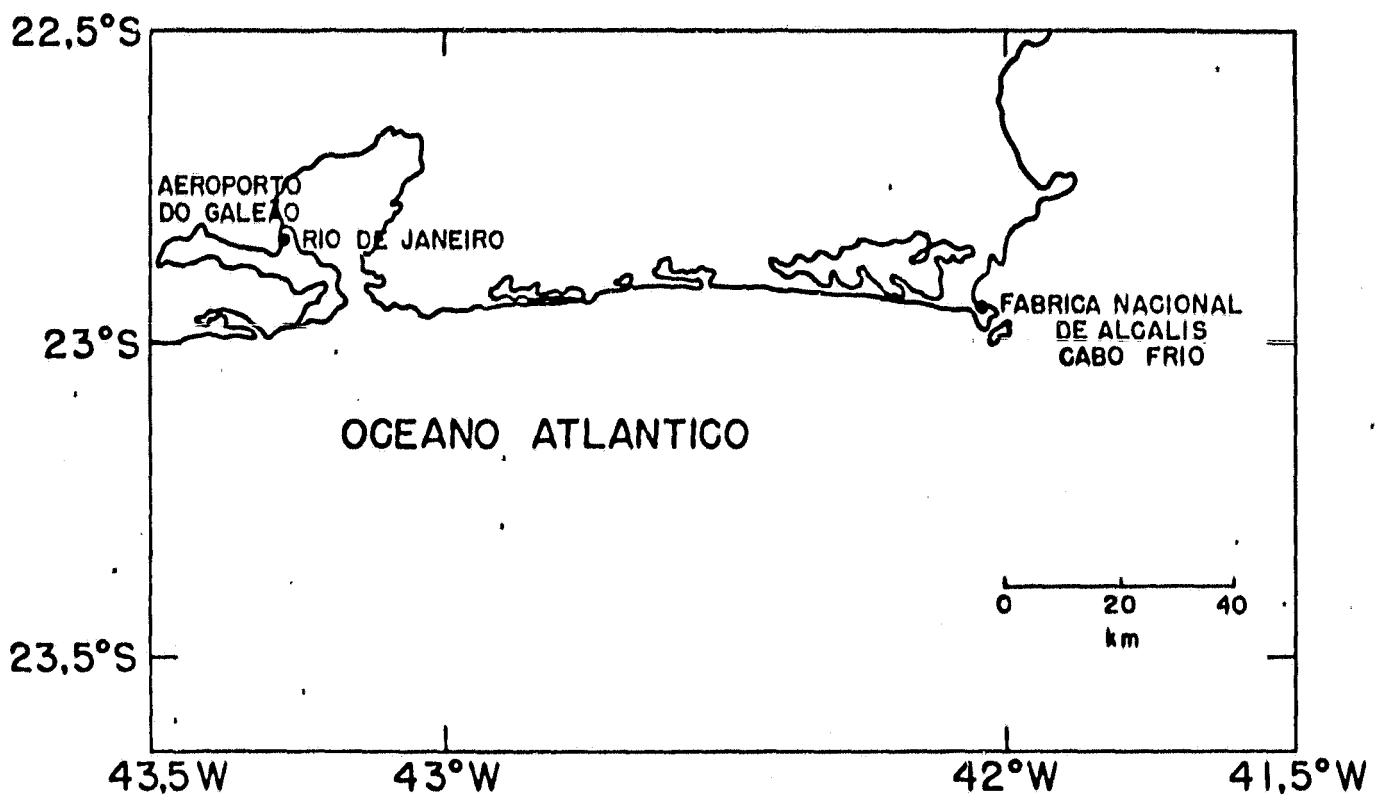


Fig. 1 - Local de estudo.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

Tabela 2. Parâmetros utilizados para determinar as condições de esta-  
bilidade para os três casos escolhidos.

CASO Nº	DATA	TEMPERATURA (°C)		T.V.V.T. (°C/100m)	VENTO SUPERFICIAL		U <sub>f</sub> ms <sup>-1</sup>	ELEVAÇÃO SOLAR	COBERTURA DE NUVENS (%)
		DO AR (T <sub>a</sub> )	DA ÁGUA SUPERFICIAL (T <sub>w</sub> )		DIREÇÃO	VELOCIDADE (ms <sup>-1</sup> )			
01	18/4/75	25,0	22,5	-0,72	N	1,0	5,8	360	20
02	23/6/76	23,0	22,0	0,56	NNE	3,3	4,8	220	0
03	22/5/77	21,0	23,0	0,47	W	1,1	4,7	300	40

U<sub>f</sub> = velocidade do vento tomado no nível de 500m .

T.V.V.T. = Taxa de variação vertical da temperatura.

O segundo grupo de dados compreende valores de temperatura da água superficial do mar, velocidade e direção do vento para períodos de uma semana, na região de Cabo Frio, os quais são apresentados na Tabela 3.

## 5. Imagens LANDSAT

Os satélites da série LANDSAT anteriormente denominada ERTS, são plataformas de sensoramento remoto de dados colocadas em órbita terrestre de grande inclinação com o equador, quase-circular, a uma altitude de aproximadamente 918 km. A trajetória orbital é feita de maneira síncrona com o sol, sendo o período orbital de 103 min 16s. Este efeito faz com que, após 251 revoluções (isto é, a cada 18 dias), o satélite volte a imagear o mesmo local.

O imageador multiespectral MSS-LANDSAT, daqui para a frente denominado somente MSS, é um dos subsistemas do satélite e consiste num espelho oscilatório e num sistema ótico que reflete a radiação vinda da cena, num conjunto de 24 detetores divididos em 4 bandas ou canais, cada um com 6 detetores. Cada banda é sensível a uma determinada faixa do espectro, a saber:

canal 4 - 0,5 a 0,6 $\mu\text{m}$	} visível
canal 5 - 0,6 a 0,7 $\mu\text{m}$	
canal 6 - 0,7 a 0,8 $\mu\text{m}$	} infra-vermelho próximo
canal 7 - 0,8 a 1,1 $\mu\text{m}$	

### 5.1 - Sistema I-100

O sistema interativo de análise de imagem multiespectral (I-100) é um sistema que realiza a classificação semi-automática de imagens, extraíndo informações temáticas de toda a cena ou de parte dela. A entrada da imagem no sistema se dá por meio de fitas magnéticas compatíveis com computadores (CCT), que fornecem:

- a) o nível de cinza em cada canal do MSS, para cada "pixel", onde o sistema acessa os quatro canais ao mesmo tempo, e

		HORÁRIO (MT)											
		12 00				18 00				24 00			
CPSO Nº	DATA	DIREÇÃO DO VENTO	VELOCIDADE DO VENTO (m s <sup>-1</sup> )	TEMPERATURA DO AR (°C)	TEMPERATURA DA ÁGUA SUPERFICIAL (°C)	DIREÇÃO DO VENTO	VELOCIDADE DO VENTO (m s <sup>-1</sup> )	TEMPERATURA DO AR (°C)	TEMPERATURA DA ÁGUA SUPERFICIAL (°C)	DIREÇÃO DO VENTO	VELOCIDADE DO VENTO (m s <sup>-1</sup> )	TEMPERATURA DO AR (°C)	TEMPERATURA DA ÁGUA SUPERFICIAL (°C)
01	11/04/75	C	0,0	23,0	16,5	SW	4,0	24,0	16,0	SW	3,0	24,0	16,5
	12/04/75	SW	4,0	23,0	18,0	S	6,0	25,0	21,5	SW	3,0	22,0	22,0
	13/04/75	SW	4,0	24,0	22,5	S	4,0	25,0	22,5	E	0,0	21,0	23,0
	14/04/75	N	1,0	25,0	23,0	NE	4,0	26,0	23,0	NE	7,0	23,0	23,0
	15/04/75	NE	8,0	25,0	21,5	NE	1,0	26,0	21,0	SW	4,0	23,0	21,5
	16/04/75	SW	7,0	22,0	22,0	S	8,0	24,0	23,0	SW	3,0	21,0	23,0
	17/04/75	S	1,0	23,0	23,0	E	2,0	26,0	23,5	NE	2,0	22,0	23,0
	18/04/75	N	1,0	25,0	22,5	NE	5,0	26,0	23,0	N	3,0	22,0	23,0
02	17/06/76	C	0,0	21,0	22,5	SE	7,8	23,0	23,0	SE	4,3	22,0	23,0
	18/06/76	C	0,0	23,0	23,0	NE	6,8	25,0	23,5	N	5,5	22,0	23,0
	19/06/76	NW	2,1	22,0	22,5	SE	2,5	26,0	23,0	N	2,8	21,0	23,0
	20/06/76	W	1,3	22,0	22,5	NE	2,1	22,0	22,5	N	1,6	21,0	22,5
	21/06/76	NNE	6,1	22,0	22,5	NNE	8,0	25,0	22,5	N	6,3	22,0	22,5
	22/06/76	NNE	7,0	23,0	22,5	NNE	5,8	24,0	22,5	N	5,5	21,0	22,0
	23/06/76	NNE	8,3	23,0	22,0	NE	10,5	25,0	22,0	N	6,6	22,0	22,0
	03	16/05/77	N	5,0	26,0	23,5	S	7,5	28,0	24,5	SE	9,1	22,0
17/05/77		SW	10,0	17,0	23,5	SW	10,8	21,0	23,0	SW	8,0	20,0	23,5
18/05/77		W	5,3	18,0	23,5	S	5,5	22,0	23,5	SW	4,0	19,0	23,5
19/05/77		W	3,8	20,0	23,5	S	6,3	22,0	23,5	S	1,5	21,0	23,0
20/05/77		S	2,5	18,0	23,0	SE	1,6	22,0	23,0	C	0,0	21,0	23,0
21/05/77		N	1,6	20,0	23,0	NE	6,6	24,0	23,0	S	3,3	21,0	23,0
22/05/77		W	1,1	21,0	23,0	S	2,5	24,0	23,0	NW	1,1	21,0	23,0

- b) as coordenadas de cada "pixel" em relação à matriz de 3240 x 2340 "pixels" que compõem uma imagem.

A imagem, depois de ter sido acessada, pode ser projetada total ou parcialmente em um terminal de vídeo colorido. Este terminal funciona como uma tela de televisão e possui: 512 x 512 pontos ("pixels" do I-100), sendo que para cada ponto é transferido um "pixel" da imagem. Dependendo do tamanho da área, que foi projetada no vídeo, ocorrerá uma ampliação maior ou menor da imagem. O sistema realiza a classificação semi-automática das imagens, segundo um método interativo (análise/máquina) baseado em:

- a) informações fornecidas pelo analista, as quais são introduzidas por meio de áreas de treinamento, ou seja, áreas de características multiespectrais conhecidas;
- b) programas de classificação, através dos quais o analista processa os dados introduzidos e procura alcançar os resultados desejados.

O resultado da classificação aparece em tempo real no terminal de vídeo colorido. Neste ponto, o analista interpreta o resultado e, se quiser, pode modificá-lo através da utilização de um outro programa, até alcançar um resultado satisfatório. Há uma interação total entre o analista e a máquina, proporcionando uma realimentação do sistema em um curto espaço de tempo.

## 5.2 - Processamento das Fotografias

As imagens são inicialmente digitalizadas em fitas magnéticas e processadas no I-100. Tendo-se em vista que cada imagem apresenta uma condição específica, escolheu-se por comparação visual, o canal ou canais com os melhores registros da pluma. Utilizou-se, também, um dispositivo de multiplicação de tons de cinza a fim de melhorar o contraste.



As imagens no I-100 são fotografadas com filmes negativos e/ou com diapositivos, dos quais se obtêm ampliações em cópias de papel. A partir das ampliações, estabelece-se o contorno aparente da pluma e fazem-se medidas para a determinação do parâmetro  $\sigma_y$  em função da distância da fonte. Assume-se que a distribuição de concentração na pluma seja aproximadamente gaussiana, obtendo-se então, os valores de  $\sigma_y$  a partir da relação  $Y(x) = 2,15 \sigma_y$ , onde  $Y(x)$  é a distância horizontal transversal medida do centro da pluma ( $Q$ ) até o contorno, onde se assume que a concentração é aproximadamente 10% daquela do centro da pluma ( $X = 0,1 X Q$ ), conforme mostrado na Figura 2.

## 6. Resultados

Com a aplicação do sensoriamento remoto, utilizando-se imagens do satélite LANDSAT, realizaram-se medidas de  $\sigma_y$  em três dias diferentes. Nas Figuras 4, 6 e 8 estão plotados os valores de  $\sigma_y$ , obtidos através das fotografias, e os valores calculados a partir dos três métodos propostos. Salienta-se que os métodos de Pasquill-Gifford (P-G) e Jülich (J), utilizaram, para classificação da categoria de estabilidade, os parâmetros meteorológicos apresentados por Turner (1970), (Tabela 3.1), enquanto o método de Högström utiliza o parâmetro definido na Equação 5, onde:

$1 < R_s < 30$  para a categoria de estabilidade neutra; e

$R_s > 30$  para a categoria de estabilidade estável.

Desta maneira, os três casos serão discutidos do ponto de vista dos três métodos. Calculou-se também a porcentagem de erro para as distâncias de 1, 5, 10, 15 e 20 km de distância da fonte, e os resultados estão apresentados na Tabela 4. A seguir discutir-se-ão os resultados de cada caso.

### Caso nº 1

Medidas de  $\sigma_y$  foram feitas utilizando-se a fotografia obtida do satélite LANDSAT do dia 18/4/75, Figura 3, e os valores encon

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

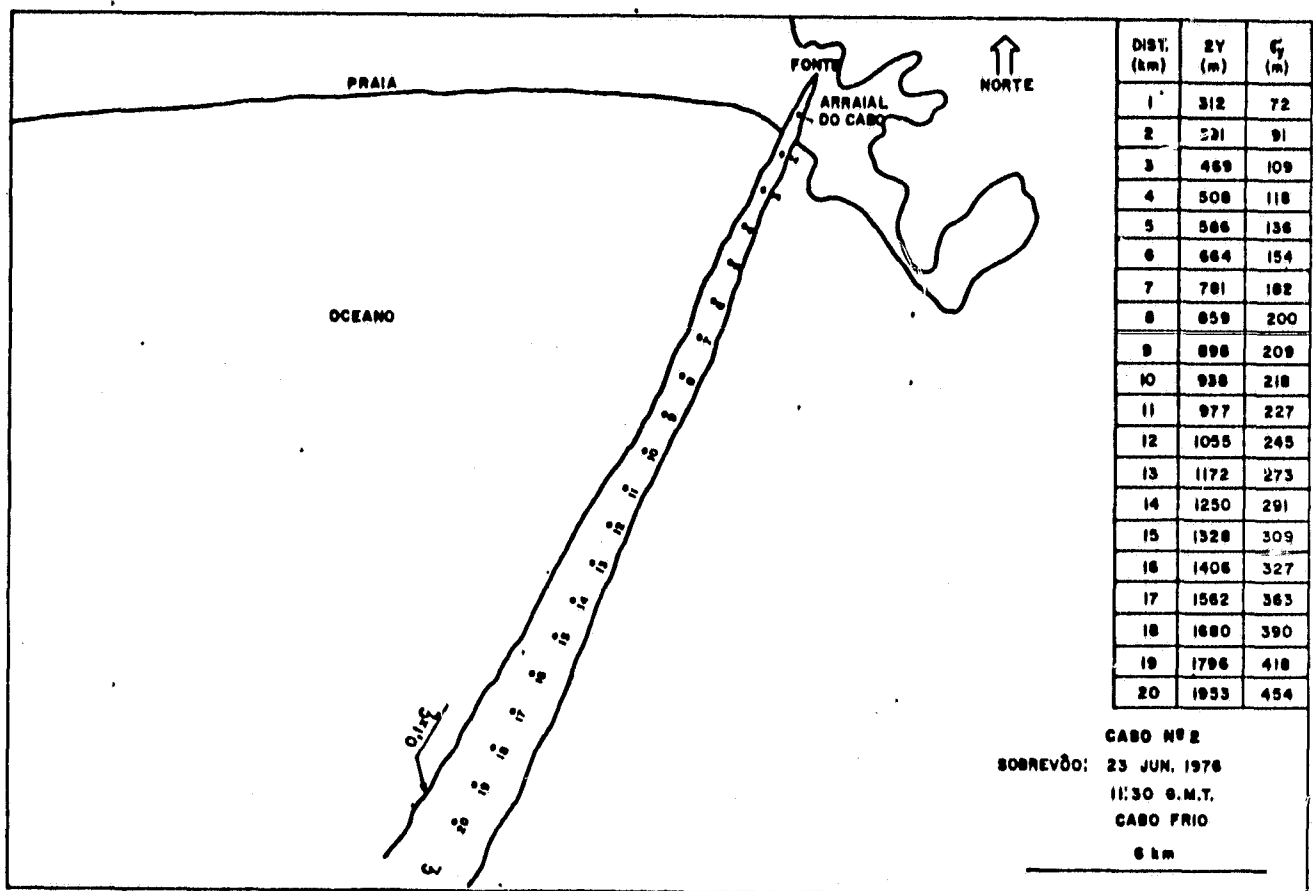


Figura 2 - Avaliação de  $\sigma_y$  a partir da ampliação obtida.

~~ORIGINAL PAGE~~  
~~BLACK AND WHITE PHOTOGRAPH~~

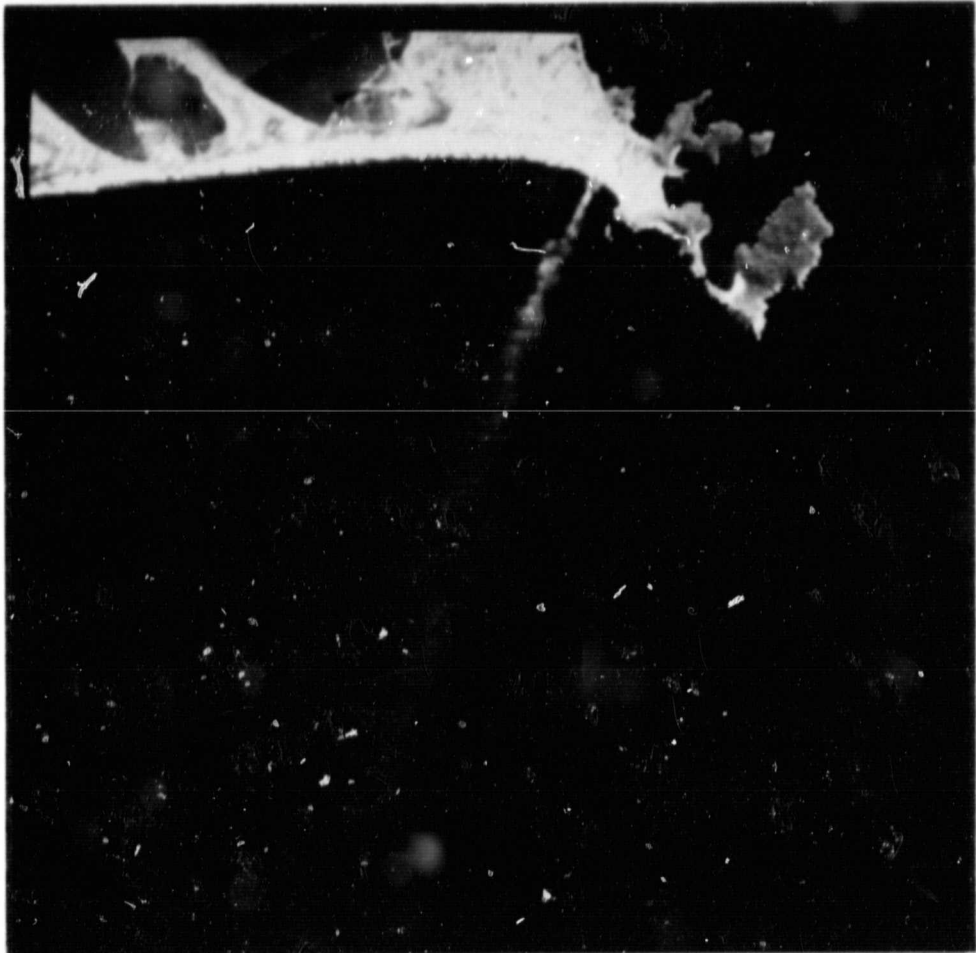


Figura 3 - Fotografia obtida da imagem do  
MSS do LANDSAT; Caso nº 1.

~~ORIGINAL PAGE~~  
~~COLOR PHOTOGRAPH~~

tram-se plotados na Figura 4. Para este dia a categoria de estabilidade determinada pelo métodos de P-G foi A/B. Entretanto, os valores medidos na fotografia apresentaram-se próximos daqueles previstos por P-G para a classe de estabilidade neutra (D). Portanto, o método de P-G superestimou os valores de  $\sigma_y$  (66% para a distância de 1 km, 163% para 5 km e 136% para 10 km), conforme mostra a Tabela 4. O método de Jülich, que utiliza a mesma categoria de estabilidade do método de P-G, apresentou valores de  $\sigma_y$  que superestimaram os valores medidos em 115%, 265% e 246% para as distâncias de 1, 5 e 10 km, respectivamente. Já o método de Högström, que utiliza outro critério para determinar a categoria de estabilidade, baseando-se na Taxa de Variação Vertical da Temperatura (TVVT) e na Velocidade do vento no nível de 500 m (Equação 5), apresentou valores de  $\sigma_y$  bastante concordantes com aqueles medidos na fotografia, onde a porcentagem de erro obtida (0%, 28% e 3% para as distâncias de 1, 5 e 10 km, respectivamente) é baixa.

Embora se tenha feito uma comparação dos valores de  $\sigma_y$  com os métodos descritos, ressalta-se que cada experimento foi realizado em condições diferentes. No experimento realizado por Pasquill (1961), a emissão tomou lugar próximo ao nível do solo, com um comprimento de rugosidade em torno de 3 cm; e medidas de concentração ao nível do solo foram feitas para distâncias menores que 1 km da fonte. Para distâncias maiores que 1 km, foram feitas extrapolações baseadas em alguns dados experimentais. Quanto ao experimento realizado por Vogt e Geiss (1974) no Centro de Pesquisa Nuclear de Jülich, República Federal da Alemanha, para alturas de emissão de 50 e 100 metros, as medidas de concentração foram feitas até a distância de 11 km da fonte, onde parte do terreno era arável e parte arborizada. Finalmente, o método de Högström incorpora parâmetros importantes como a rugosidade superficial, altura de emissão da fonte, taxa de variação vertical da temperatura, velocidade do vento acima da camada de fricção, além de considerar que o parâmetro  $\sigma_y$  efetivo é obtido através de uma parcela  $\sigma_{yd}^2$ , que é a variância devida à difusão turbulenta, e uma parcela  $\sigma_{ys}^2$ , que é devida ao cisalhamento vertical na direção do vento e significativa para longas distâncias da fonte, considerando-se ainda o efeito do arrastamento para condições estáveis. Com relação aos baixos

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

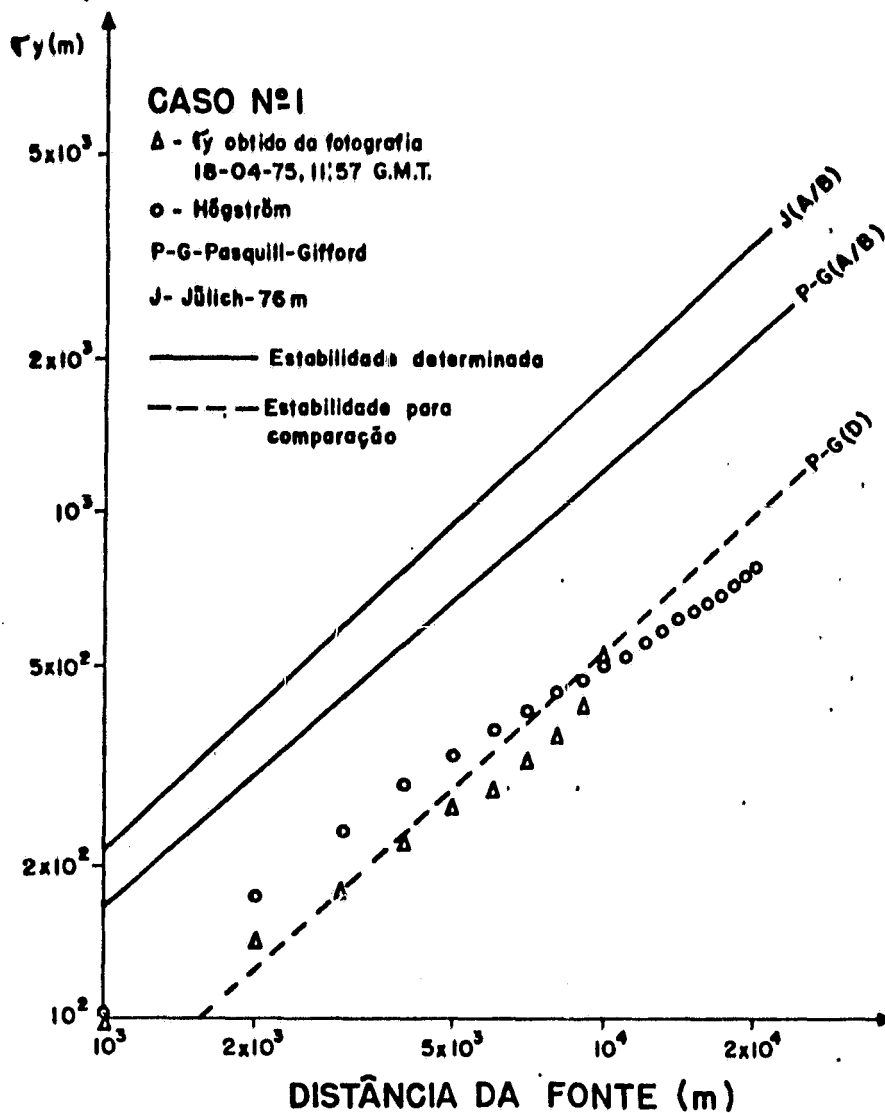


Figura 4 - Valores de  $\sigma_y$  medidos através da fotografia em função da distância da fonte, comparados com valores previstos pelos métodos de Pasquill-Gifford, Jülich e Högström.

ORIGINAL PHOTOGRAPH  
OF POOR QUALITY

Tabela 4. Porcentagem de erro (1) calculada a partir dos valores medidos na foto para os três métodos.

CASO Nº	DATA	VALORES DE $\sigma_y$						PORCENTAGEM DE ERRO (%)					
		MÉTO DO	DISTÂNCIA DA FONTE (km)					MÉTO DO	DISTÂNCIA DA FONTE (km)				
			1	5	10	15	20		1	5	10	15	20
01	18/04/75	FOTO.	100	260	520	-	-	HÖG.	0	- 28	3	-	-
		HÖG.	100	332	504	-	-		- 66	-163	-136	-	-
		P-G	166	683	1.230	-	-		-115	-265	-246	-	-
		JÜL.	215	950	1.800	-	-						
02	23/06/76	FOTO	72	136	218	309	454	HÖG.	- 25	-118	-113	- 98	- 68
		HÖG.	90	300	465	611	761		7	-111	-146	-148	-118
		P-G	67	289	537	769	991		- 64	-236	-279	-277	-227
		JÜL.	118	460	827	1.165	1.487						
03	22/05/77	FOTO	80	401	-	-	-	HÖG.	-	-	-	-	-
		HÖG.	90	299	456	584	706		-	-	-	-	-
		P-G	146	614	1.126	1.600	2.048		-	-	-	-	-
		JÜL.	204	876	1.616	2.327	3.014		-	-	-	-	-

valores medidos na fotografia, deve-se considerar que se trata de difusão sobre uma superfície de água. As características de difusividade sobre a água ainda são pouco conhecidas, comparando-se com aquelas sobre o continente. Neste trabalho os resultados foram obtidos praticamente sobre o oceano, razão pela qual os resultados previstos pelo método de P-G são bastante elevados, em comparação com os valores medidos através da fotografia. Resultados obtidos por Raynor et alii (1975) também mostraram que os valores de  $\sigma_y$  obtidos de experimentos realizados sobre uma superfície de água foram menores que os encontrados em experimentos realizados sobre o continente, sendo que para condições instáveis os valores estiveram abaixo dos previstos por P-G para a categoria C, e para condições estáveis os valores estiveram abaixo da categoria F. Lyons (1975) verificou que, após alcançarem a distância de 30 a 40 km sobre a superfície da água, algumas plumas que originalmente tinham uma característica instável (A), apresentavam características estáveis (F).

Normalmente a intensidade de turbulência sobre uma superfície de água é bem menor do que sobre o continente, devido:

- 1) ao efeito de redução da turbulência mecânica, causada pela superfície lisa da água;
- 2) às forças de flutuação resultantes da estabilização de massas de ar durante períodos de advecção de ar quente sobre água fria; e
- 3) ao grau de variação da dispersão da pluma ocorrido do continente para a água ser dependente do comprimento alcançado pela pluma sobre a região.

Desta forma, métodos teóricos e experimentais são necessários para explicar o fenômeno de dispersão na camada limite marinha.

O comportamento desta pluma é analisado tomando-se como base os dados de temperatura da superfície da água, a temperatura do ar e a situação sinótica. A pluma apresentou uma extensão de aproximadamente 50 km, com variações em seu contorno. Analisando-se a fotografia, ve

rifica-se que existe uma mudança na direção da pluma, em torno de 13 km de distância da fonte. No dia 15/4/75 houve a passagem de uma frente fria na região; ventos de SW e S persistiram até o primeiro período do dia 17/4 (Tabela 3), quando ventos de E, NE e N começaram a so prar. No instante da passagem do satélite (11:57 GMT), a direção da pluma indicava ventos de NNE, enquanto para distâncias maiores que 13 km, a direção da pluma está modificada, indicando que a direção do ven to tendera para N. O efeito de oscilação da direção do vento na dire ção da pluma foi significativo; desta forma, os valores calculados pe las equações não podem ser estendidos para distâncias maiores que 13 km, devido às restrições impostas pela condição estacionária da dire ção do vento, razão pela qual restringem-se os comentários para distân cias menores que 10 km.

A temperatura da água superficial ( $T_w$ ) na região de Ca bo Frio no instante da passagem do satélite era de 22,50°C, enquanto a temperatura do ar ( $T_a$ ) era de 25,00°C. Por isso a pluma apresenta-se muito bem definida e com características de estabilidade neutra.

### Caso nº 2

Com uma extensão em torno de 130 km, a pluma obtida no dia 23/6/76 apresentou uma configuração bastante escável, com contorno bastante definido (Figura 5). Os valores de  $\sigma_y$  medidos na fotografia foram menores que os previstos pelos métodos propostos (Figura 6), sendo que a categoria de estabilidade prevista pelo método de P-G foi neutra (D). Os valores de  $\sigma_y$  medidos apresentaram características quase neutras para distâncias próximas da fonte e assumiram características estáveis, ficando abaixo dos valores previstos pela categoria F de P-G para as distâncias maiores que 5 km. Todos os métodos superestimaram os valores de  $\sigma_y$  medidos, em todo o intervalo (Tabela 4).

Dados de temperatura da água superficial para o período de 16/6 a 23/6 (Tabela 3) forneceram uma temperatura média de 22,60 C, enquanto a temperatura média do ar foi de 22,70 C. No instante da pas sagem do satélite (11:38 GMT) registrou-se  $T_w = 22,00$  C e  $T_a = 23,00$  C,



ORIGINAL PAGE  
COLOR PHOTOGRAPH

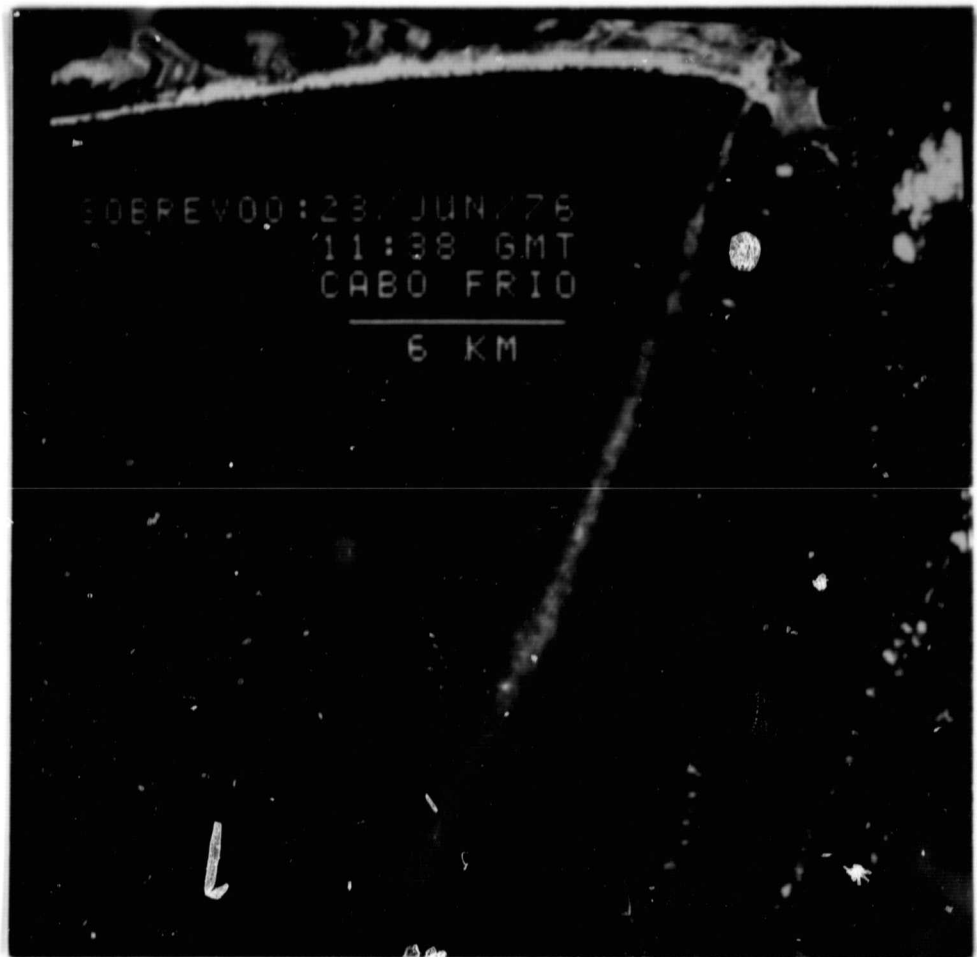


Figura 5 - Fotografia obtida da imagem do MSS  
do LANDSAT; Caso nº 2.

# ORIGINALITY OF POOR QUALITY

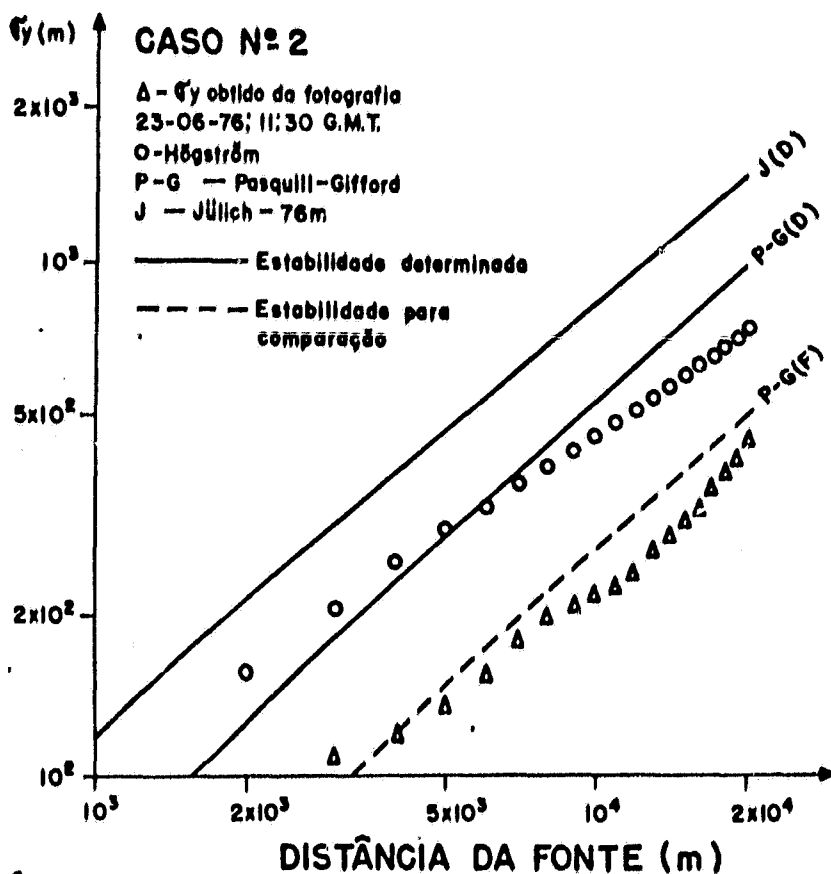


Figura 6 - Valores de  $\sigma_y$  medidos através de fotografia em função da distância da fonte, comparados com valores previstos pelos métodos de Pasquill-Gifford, Jülich e Högstöm.

além de se verificar que a elevação solar foi de  $22^\circ$  e a direção e intensidade do vento foram de NNE e  $8,3 \text{ ms}^{-1}$ , respectivamente. Dados de radiossondagem do Galeão mostraram a existência de uma inversão com base na superfície que se estende até 250 m de altura, acima da qual existia uma camada neutra. A mesma situação fora notada no dia anterior. A direção do vento sofreu variações no período de 17/6 a 20/6, devido à entrada de uma frente que acabou se dissipando no dia 19/6. A partir do dia 20/6 houve a predominância do anticiclone subtropical que se estendeu sobre parte do continente, predominando em toda região costeira. A partir do dia 21/6 a direção do vento passou a ser de NNE, com variações noturnas para N, com altas velocidades (Tabela 3). Por isso a pluma apresentou-se muito bem definida e com uma longa extensão.

### Caso nº 3

Neste caso, a fotografia obtida da imagem do dia 22/5/77 (Figura 7) mostra uma pluma de curta extensão ( $\sim 20 \text{ km}$ ) com características não muito bem definidas. O contorno estabelecido para esta pluma não representa a realidade, em termos de difusão para os métodos existentes, que consideram a direção do vento constante. Este caso está sendo apresentado para evidenciar os erros que poderão ocorrer nas medidas de  $\sigma_y$ , quando as condições de contorno da pluma não forem muito bem definidas.

Houve no período de 16/5 a 22/5 muitas variações na direção do vento (Tabela 3), o que pode ser observado na fotografia apresentada na Figura 7, onde a pluma aparece mais bem definida até a distância de 5 km da fonte, o que caracteriza um período de aproximadamente 1 hora com ventos de SW. Para este mesmo período a temperatura da água superficial apresentou-se maior que a temperatura do ar; no instante da passagem do satélite registrou-se  $T_w = 23,00^\circ \text{C}$  e  $T_a = 21,00^\circ \text{C}$ . No dia 17/5 houve a passagem de uma frente fria na região, que ocasionou variações na direção do vento.

Considera-se que os resultados apresentados na Figura 8 não podem ser comparados com os previstos pelo métodos propostos, ra

ORIGINAL PAGE  
COLOR PHOTOGRAPH

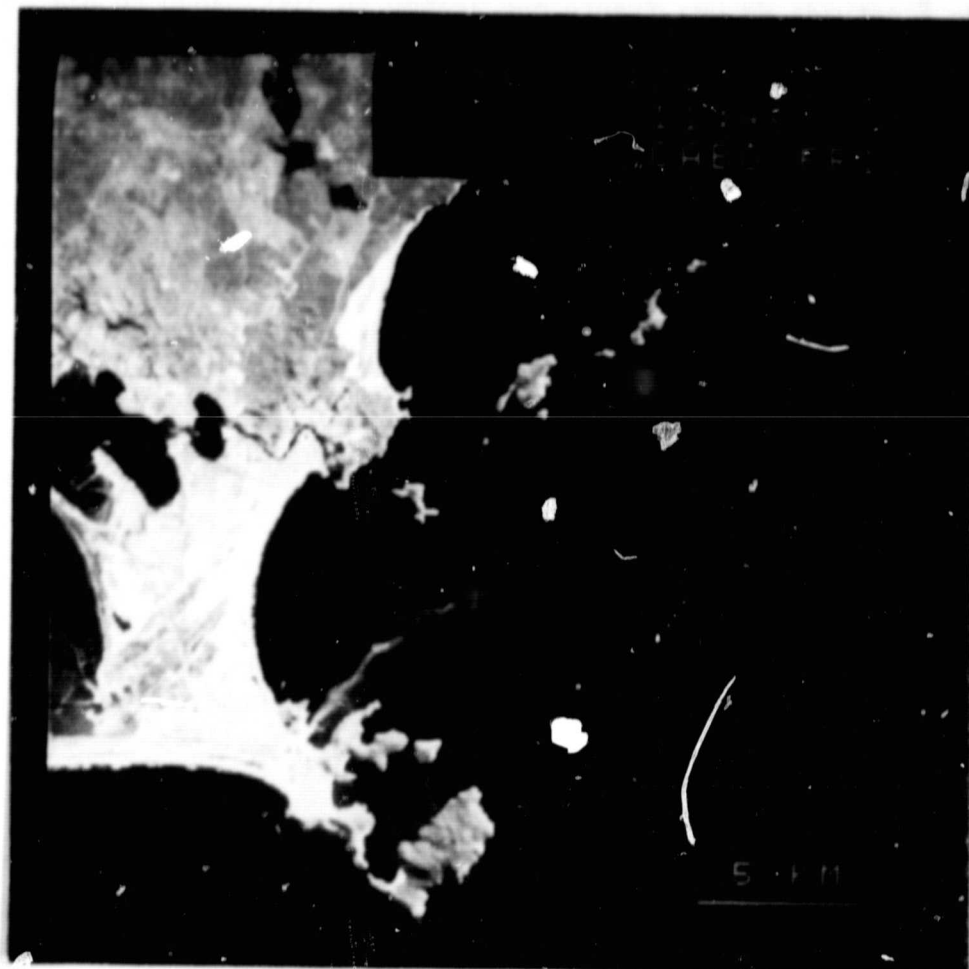


Figura 7 - Fotografia obtida da imagem do MSS  
do LANDSAT; Caso nº 3.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

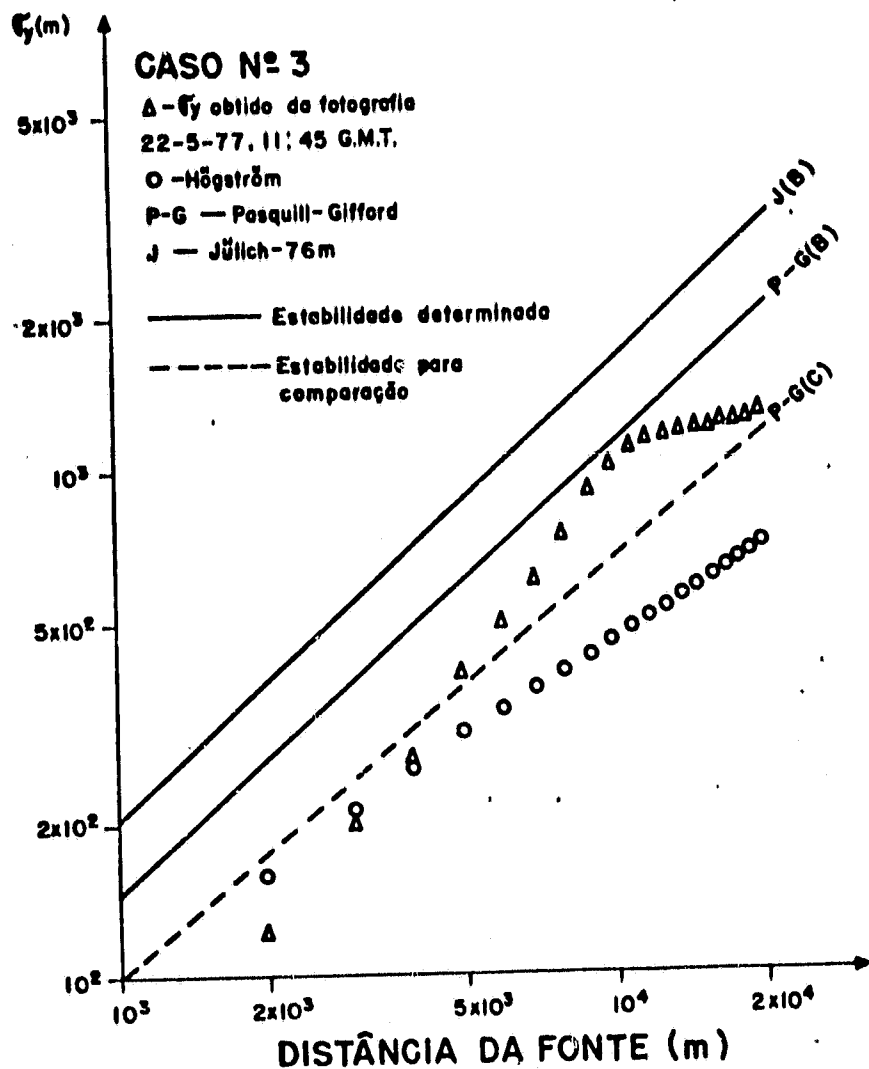


Figura 8 - Valores de  $\zeta_y$  medidos através da fotografia em função da distância da fonte, comparados com valores previstos pelos métodos de Pasquill-Gifford, Jülich e Högeström.

ção pela qual se deixa de apresentar o cálculo das porcentagens de erro (Tabela 4) devido ao fato de não serem representativos de uma situação normal. No entanto, documentam uma situação que pode propor novos critérios para o cálculo de concentração de poluentes para longas distâncias da fonte, levando-se em conta as variações que ocorrem na direção do vento e a sua velocidade, fato que ocorre constantemente no meio ambiente.

## 7. Conclusões

Analisando-se os resultados alcançados neste trabalho, tiram-se as seguintes conclusões:

- A entrada da frente fria na região de Cabo Frio provoca variações na direção da pluma, destruindo a sua configuração inicial e formando uma pluma que, ao longo de sua extensão, apresenta direções alternantes (Caso nº 3).
- A difusão sobre o oceano difere apreciavelmente da que ocorre sobre o continente, e o comportamento da pluma é altamente dependente da estabilidade do ar sobre o oceano, principalmente nos baixos níveis, onde a difusão é governada pela diferença de temperatura existente entre a água e o ar.
- A pluma mais extensa foi verificada para uma condição estável (Caso nº 2), alcançando 130 km de comprimento sobre o oceano. Para este caso verificou-se que a velocidade do vento foi maior que  $8 \text{ ms}^{-1}$  e que a direção do vento permaneceu aproximadamente constante em torno de NNE.
- Embora neste trabalho tenham sido usados os métodos de Pasquill-Gifford, Jülich e Högström para comparar os valores de  $\sigma_y$  medidos através das fotografias, cabe ressaltar que esses métodos são bastante limitados, visto que foram formalizados para serem usados sobre o continente e para emissões de curta duração. Com relação ao método de Pasquill-Gifford, os valores medidos nas fotografias assumiram valores que estiveram entre

1/3 e 1/2 dos previstos, dependendo da classe de estabilidade e da distância da fonte.

- O método de Högström demonstra ser eficiente na avaliação de  $\sigma_y$  para o caso quase neutro (Figura 4), ao contrário do caso estável (Figura 6) que apresentou alta porcentagem de erro (Tabela 3).
- O método de JÜlich apresentou porcentagem de erro que variou entre 100 e 300%, demonstrando que sua utilização é restrita a locais que apresentem rugosidade superficial alta. Portanto, quando em alguma situação estes métodos forem utilizados sobre superfície de água, sugere-se que os valores de  $\sigma_y$  obtidos sejam devidamente corrigidos.

Este trabalho demonstrou que a utilização do Sensoriamento Remoto, através de imagens de satélites, para o estudo da difusão atmosférica é de suma importância e aplicabilidade prática, principalmente sobre o oceano, onde as plumas alcançam longas extensões e pelo fato de não existirem estudos de difusão em larga escala sobre a água, comparáveis com aqueles realizados sobre o continente. Acrescente-se o fato da excelente qualidade das fotografias obtidas, devido ao contraste entre a pluma e a superfície de água, possibilitando determinar os contornos da pluma de uma forma contínua. Esta técnica será de grande utilidade para estudos futuros, permitindo que se estabeleçam modelos para diferentes regiões.

### Agradecimentos

Os autores são gratos aos Drs. Nelson de Jesus Parada, Diretor, e Antonio Divino Moura, Chefe do Departamento de Meteorologia do Instituto de Pesquisas Espaciais, pelo apoio. José Aparecido Torsani agradece, também, ao PRONUCLEAR (Programa de Recursos Humanos para o Setor Nuclear) a concessão de bolsa de estudo. Agradecem, também, ao Dr. Fausto Carlos de Almeida a revisão do texto; ao Sr. José Carlos Moreira a colaboração no processamento das imagens no I-100; aos membros da secção de desenho do INPE a preparação das figuras, à Mari<sup>l</sup>ia Prado de Carvalho a correção da linguagem, e à Fátima Ricco dos Santos a datilografia do texto.

Este trabalho foi parcialmente patrocinado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), sob contrato B-28-79-001.



### Referências

1. Counihan, J., 1975. Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880- 1972. *Atm. Environ.*, 9, 871-905.
2. Gifford, F., 1961. Use of meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nuclear safety*, 2, 47-51.
3. Högström, U., 1964: An experimental study on atmospheric diffusion. *Tellus*, 16 (2), 205-251.
4. Lyons, W.A., 1975. *Turbulent diffusion and pollutant transport in shoreline environments*. Lectures on air pollution and environmental impact analyses, sponsored by the AMS, Sept. 29-3 Oct. 1975, Boston, Mass., D.A. Haugen (Workshop Coordinator), AMS, Boston, Mass., U.S.A., 136-208.
5. Pasquill, F., 1961. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorol. Mag.*, 90(1063), 33-49.
6. Randerson, D., 1968. A study of air pollution sources as viewed by earth satellites. *J. Air Pol. Contr. Assoc.*, 18, 249-253.
7. Raynor, G.S., Michael P., Brown, R.M., Sethuraman, S., 1975. Studies of atmospheric diffusion from a nearshore oceanic site. *J. Appl. Meteor.*, 14, 1080-1094.
8. Turner, D.B., 1970. *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. Environmental Protection Agency, North Carolina, USA.
9. Vogt, K.J., Geiss, H., 1974. *Tracer experiments on dispersion of plumes over terrain of major surface roughness*. Report n° Jul-1131, st, Jülich, F.D.R., October 1974.
10. Vogt, K.J., 1977. Empirical investigations of the diffusion of waste air plumes in the atmosphere. *Nuclear Technology*, 34, 43-57.